

## Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima

**Marin Brkić**

Satira d.o.o., mag. ing. aedif.  
marin.brkic@gf.sum.ba

**Veljko Srzić**

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, dr. sc.  
vsrzic@gradst.hr

**Sažetak:** Utjecaj smanjenja razine podzemne vode igra važnu ulogu u intruziji morske vode u obalne vodonosnike. Intruzija morske vode postaje glavno ograničenje za korištenje slatke podzemne vode u obalnim vodonosnicima. Cilj ovoga rada je laboratorijskim eksperimentom uspostaviti model simulacije procesa intruzije morske vode u poroznom obalnom vodonosniku, te generirati skupove podataka za opisivanje intruzije slanog klina u poroznom mediju u ovisnosti o vremenu. Eksperiment je odrađen s jednim poroznim medijem određene poroznosti i sa stalnim hidrauličkim gradijentom. Eksperiment je pokazao da je najveća intruzija slanoga klina na samome početku eksperimenta, te da je miješanje slatke i slane vode neznatno. Vremenom promjene slanog klina postaju neznatne i klin doseže stanje ravnoteže. Rezultati ovoga eksperimenta će pomoći u budućem planiranju rješavanja problema intruzije slane vode u obalne vodonosnike.

**Ključne riječi:** intruzija morske vode, laboratorijski eksperiment, klin slane vode, obalni vodonosnik, podzemna voda

## Modeling of seawater intrusion into coastal aquifers in laboratory conditions

**Abstract:** The impact of groundwater level reduction plays an important role in the intrusion of seawater in coastal aquifers. Seawater intrusion is becoming the main constraint on the use of fresh groundwater in coastal aquifers. The aim of this study is to establish the simulation model of the seawater intrusion process in a porous coastal aquifer and to generate data sets for describing the intrusion of a saltwater wedge in a porous medium as a function of time. The experiment was performed with one porous medium of a certain porosity and with a constant hydraulic gradient. The experiment showed that the largest intrusion of the salt wedge was at the very beginning of the experiment and that the mixing zone of fresh and salt water was insignificant. Over time the changes of the salt wedge become insignificant and the salt wedge reached a steady state condition. The results of this experiment will help in future planning to solve the problem of salt water intrusion into coastal aquifers.

**Key words:** seawater intrusion, laboratory experiment, saltwater wedge, coastal aquifer, groundwater

## 1. UVOD

Intruzija morske vode je često glavno ograničenje za korištenje slatke podzemne vode u obalnim vodonosnicima. Pretjerano korištenje podzemne vode, kao odgovor na pogoršano stanje količine i kvalitete dostupnih površinskih voda, doveli su do spuštanja razine podzemnih voda. Zajedno s kontinuiranim rastom razine mora zbog globalnog zatopljenja, obalni vodonosnici su pod još većom prijetnjom. Oko 70% svjetske populacije živi u obalnim područjima [1]. Pretjerano iskorištavanje podzemne vode rezultiralo je intruzijom morske vode u zaljev Laizhou, Kina [2]. Slanost mnogih uzoraka podzemne vode veća je od 1000 mg/L na području do deset kilometara u unutrašnjost od obale [3]. Intruzija morske vode zahvatila je područje od 700 km<sup>2</sup>, te prouzrokovala veliku štetu lokalnoj poljoprivrednoj industriji [3]. Upravljanje intruzijom slane vode u obalne vodonosnike jedan je od najizazovnijih problema upravljanja okolišem na svijetu [4]. Znanstvenici su se usredotočili na sam mehanizam, matematički model, te rješavanje, predviđanje i sprečavanje upada morske vode [5].

Primijenjena su matematička rješenja i numeričke metode za rješavanje intruzije morske vode [6]. Harold Henry smatrao je kao problem intruziju slane vode u ograničene vodonosnike i razvio analitičko rješenje u svojoj doktorskoj disertaciji. Henry je proučavao problem prijenosa slanoga klina u pravokutnom, zasićenom, dvodimenzionalnom i ograničenom poroznom području [7]. Henry-jev analitički izraz je ukazao na određene pogreške i predložile su se odgovarajuće ispravke. Ove ispravke omogućile su podudaranja numeričkih rezultata budućih istražitelja s Henry-jevim rješenjima [8]. Ketabchi i suradnici koristili su analitička rješenja analiziranjem podzemne vode na dvoslojnim otocima pod utjecajem povećanja razine morske vode [9]. Shi i suradnici su procijenili utjecaj ravnotežnog upada morske vode tijekom povećanja razine mora na slojevitom obalnom vodonosniku [10]. Primjene analitičkih metoda za procjenu položaja morskih voda u obalnim vodonosnicima zahtijevaju mnoge pretpostavke kao npr. prijelaznu zonu između slane i slatke vode [11].

Numeričke metode mogu prikazati realističniji upad morske vode s obzirom na učinak disperzije [11]. Abd-Elhamin i Javadi razvili su metodu konačnih elemenata u ovisnosti o gustoći za proučavanje intruzije slane vode u obalne vodonosnike. Varijabilnosti gustoće slane vode i disperzija su uzete u simulaciju [12]. Mehdizadeh i suradnici istraživali su postupni i trenutni učinak porasta morske vode na intruziju morske vode u slojevitim vodonosnicima korištenjem SEAWAT-a [13]. Sun i suradnici istraživali su utjecaj graničnih uvjeta u unutrašnjosti na intruziju slanog klina u obalnim vodonosnicima tijekom povećanja razine mora. Numerička simulacija je odrađena koristeći TOUGH2/EOS7 [14]. Sefelnasr i Sherif istraživali su učinak intruzije morske vode tijekom porasta razine Sredozemnog mora na delti rijeke Nila koristeći FEFLOW [15].

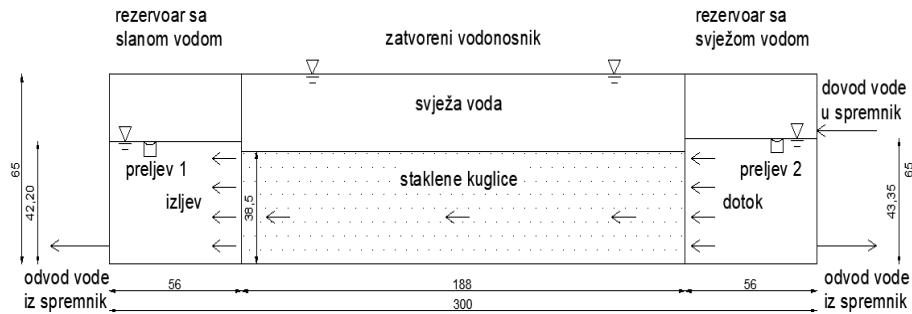
Istraživači su također istraživali intruziju slanog klina u vodonosniku laboratorijskim putem. Goswami i Clement su proveli eksperiment dinamike intruzije slane vode u porozni medij pod različitim hidrauličkim gradijentima [16]. Kuan i suradnici istraživali su utjecaj plime i oseke na intruziju slanog klina u pješčanom kanalu [17]. Jin Na i suradnici istraživali su utjecaj promjene gustoće morske vode kroz različite hidrauličke gradijente na intruziju morske vode u ograničene obalne vodonosnike [18].

Cilj ovoga rada je laboratorijski uspostaviti model koji ima kapacitet simulacije procesa intruzije soli u porozni obalni vodonosnik. Izveden je eksperiment intruzije morske vode u porozni vodonosnik koji uključuje i pripreme radnje kao što je određivanje hidrauličke propusnosti. Cilj rada je također generirati skupove podataka za opisivanje intruzije slanog klina u porozni medij koji su u ovisnosti o vremenu. Glavni hidrogeološki čimbenici koji utječu na transport slane vode u obalni vodonosnik su definirani i jasno naznačeni.

Brkić, M., Srzić, V.

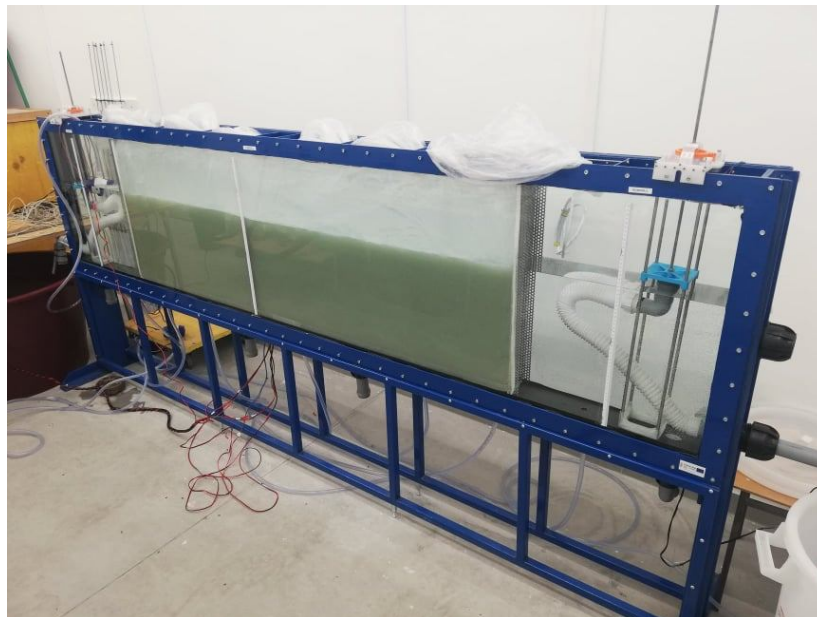
**Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima****2. PRIPREMA EKSPERIMENTA**

Eksperiment je izveden u pravokutnom protočnom spremniku. Dimenzije spremnika su 300 cm (dužina), 65 cm (visina) i 12,5 cm (širina). Shema samog spremnika prikazana je na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz spremnika

Spremnik je napravljen od čelika i stakla, te se sastoji od tri komore. Model zatvorenog vodonosnika nalazi se u srednjoj komori koja je zapunjena poroznim medijem u potpuno zasićenim uvjetima u visini od 38,5 cm, te dužini od 188 cm što je prikazano na slici 2. Iznad poroznog medija nalazi se sloj vode od 20 cm koji je osigurao da se vodonosnik nalazi pod tlakom što je također prikazano na slici 2. Postavljanjem vode unutar folije osigurana je stalna razina vode od 20 cm.



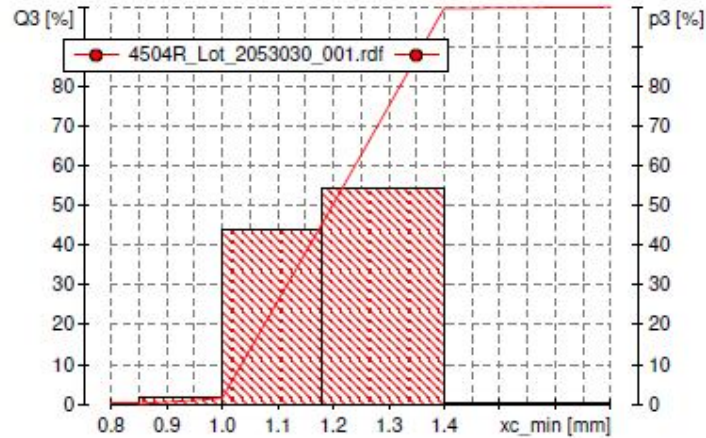
Slika 2. Prikaz komponenta spremnika

Porozni medij sastoji se od staklenih kuglica promjera od 0,85 mm do 1,4 mm što je navedeno u deklaraciji o proizvodu i prikazano na slici 3. Poroznost materijala je 39,6 %, te

Brkić, M., Srzić, V.

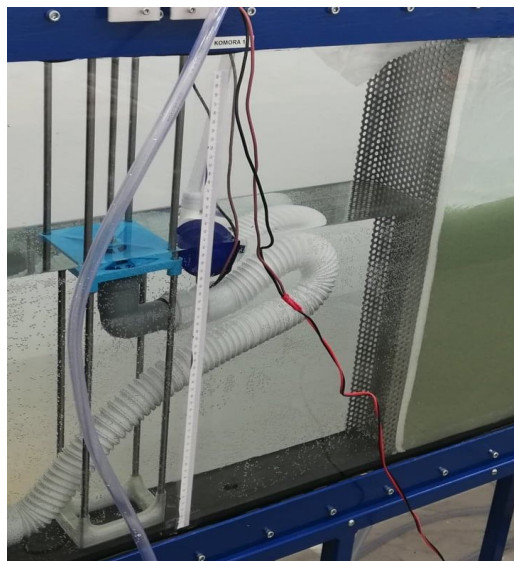
### Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima

je izračunata pomoću specifične težine koja iznosi 2,5 kg/l i nasipne gustoće za ovu frakciju koja iznosi 1,51 kg/l što je također navedeno u deklaraciji o proizvodu.



Slika 3. Postotni prikaz različitih promjera zrna (Q3) u smjesi koja je korištena u eksperimentu

Porozni medij se postepeno stavlja u komoru kako bi se izbjeglo zaglavljivanje zraka u poroznom mediju. Srednja komora odijeljena je od ostale dvije komore finom mrežicom i geotekstilom. Geotekstil ne dopušta prolazak ispunje iz srednje komore u ostale komore što je prikazano na slici 4.

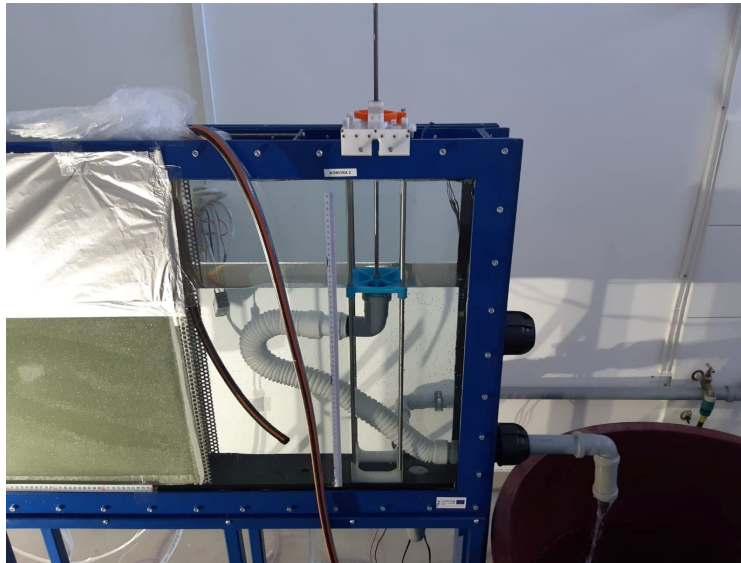


Slika 4. Prikaz fine mrežice obavijene geotekstilom

Jedna komora je ispunjena slatkom vodom, dok je druga ispunjena slanom vodom. Razina vode u ove dvije komore se kontrolira pomoću preljeva koji se pomoću vodilice mogu vertikalno pomjerati na visinu koja je potrebna. Sustav preljeva povezan je s drenažnim cijevima koje odvođe višak vode što je prikazano na slici 5.

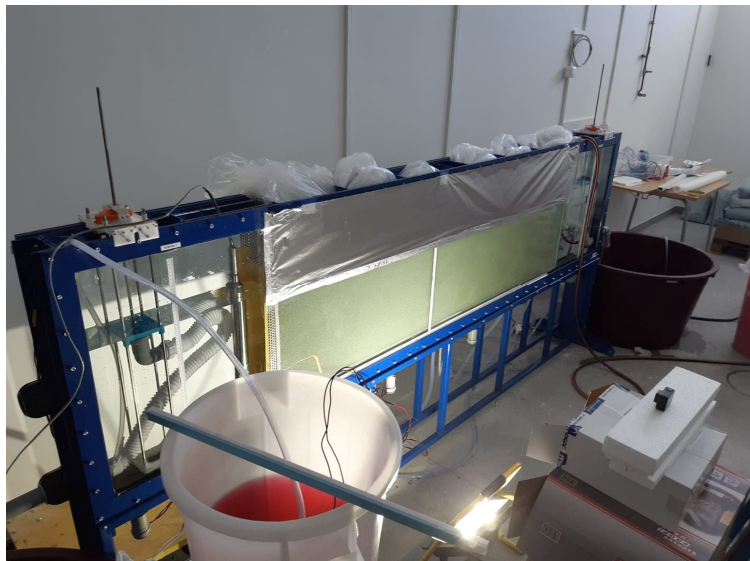
Brkić, M., Srzić, V.

**Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima**



Slika 5. Sustav preljeva povezan s dovodnim i odvodnim cijevima

Na dnu i na boku srednje komore nalijepljena je traka (izražena u cm i mm) zbog olakšanog mjerenja dimenzija slanog klina. Gornji dio srednje komore s poroznim medijem oblijepljen je aluminijskom folijom da se smanji odbljesak na slikama. Spremnik je osvijetljen reflektorom prilikom slikanja s ciljem dobivanja što jasnijih slika. Slike su snimane GoPro kamerom visoke rezolucije svake minute da bi se dobila jasna kretnja slanoga klina kroz porozni medij u ovisnosti o vremenu što je prikazano na slici 6.



Slika 6. Postavljena GoPro kamera i reflektor za slikanje prodora slanog klina

### 3. EKSPERIMENTALNI PROCESI I REZULTATI

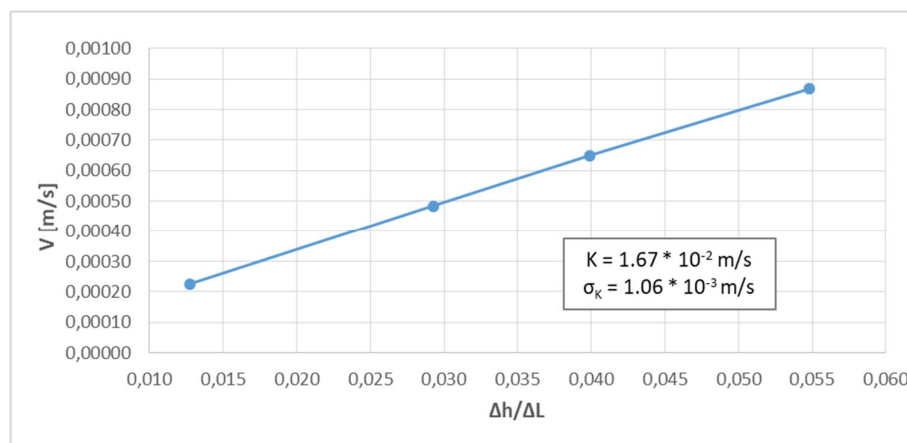
#### 3.1 Darcyjev koeficijent procjeđivanja

Pomoću odljeva na drenažnim cijevima, prije samoga eksperimenta, određen je Darcyjev koeficijent procjeđivanja poroznog medija zasnovan na već prije utvrđenom hidrauličkom gradijentu. Računato je vrijeme potrebno da se napuni epruveta volumena 600 ml. Darcyjev koeficijent procjeđivanja određen je četiri puta za četiri različita hidraulička gradijenta. Visine vodnih lica određivane su pomoću preljeva koji su povezani s vodicom. Stalni dotok slatke vode u sustavu je osiguran preko cijevi koja je spojena s vodovodom. Darcyjev koeficijent procjeđivanja ( $K$ ) računat je pomoću izraza:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{l} = -K \cdot A \frac{h_2 - h_1}{l} \quad (1)$$

gdje je  $A$  površina presjeka,  $l$  duljina toka kroz pijesak, a  $h_1$  i  $h_2$  su visine vode iznad standardne usporedne ravnine [19].

Za prvo određivanje Darcyjeva koeficijenta procjeđivanja uzvodno vodno lice namješteno je na 53,1 cm, dok je nizvodno vodno lice namješteno na 42,8 cm od dna spremnika. Potrebno je bilo 14,1 sekundi da se napuni epruveta od 600 ml, te je dobiven Darcyjev koeficijent procjeđivanja  $1,58 \cdot 10^{-2}$  m/s. Sa svakim narednim mjerenjem smanjivana je visina uzvodnog vodnog lica, dok je visina nizvodnog vodnog lica ostala ista. U zadnjem mjerenju visina uzvodnog vodnog lica namještena je na 42,8 cm, te su bile potrebne 52,3 sekunde da se napuni epruveta i dobiven je Darcyjev koeficijent procjeđivanja  $1,76 \cdot 10^{-2}$  m/s. Na osnovu četiri uzastopna mjerenja dobiven je prosječni Darcyjev koeficijent procjeđivanja  $1,67 \cdot 10^{-2}$  m/s u horizontalnom smjeru pomoću Darcyjeva zakona. Dijagram ovisnosti brzine procjeđivanja ( $v$ ) o promjeni hidrauličnog gradijenta prikazan je na slici 7.



Slika 7. Dijagram ovisnost brzine infiltracije ( $v$ ) o gradijentu ( $\Delta h/\Delta L$ )

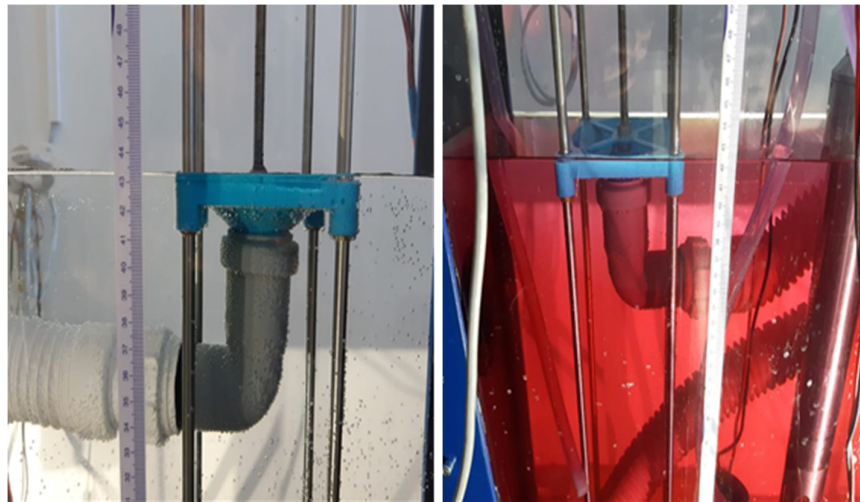
Brkić, M., Srzić, V.

## Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima

### 3.2 Simulacija intruzije morske vode u obalni vodonosnik

#### 3.2.1 Rubni uvjeti za tečenje

Na početku samoga eksperimenta obje komore su napunjene slatkom vodom s gornje strane spremnika. Slatka voda dopremala se u tank konstantnom brzinom iz vodovodne cijevi. Razina vodnog lica u komori sa slatkom vodom namještena je na 43,35 cm mjereno od dna komore. Razina slatke vode u komori s zamišljenom slanom vodom namještena je na 42,20 cm mjereno od dna komore što je prikazano na slikama 8. i 9. Stacionarno stanje održavalo se konstantnim dovodom i odvodom vode pomoću drenažnog sustava prikazanog na slici 5.



Slike 8. i 9. Prikaz razine vodnih lica u komori sa slanom i slatkom vodom

#### 3.2.2 Rubni uvjeti za intruziju

Jedna od pripremnih radnji je od slatke vode napraviti slanu vodu. Slana i slatka voda se razlikuju po mnogim parametrima. Gustoća slatke vode iznosi oko 1000 g/l, dok gustoća slane vode iznosi oko 1025 g/l. Dodavanjem soli povećava se električna vodljivost i gustoća otopine. Morska voda sadrži oko 36 g/l soli, dok slatka voda sadrži 0 g/l soli. Električna konduktivnost morske iznosi oko 55 mS/cm, dok električna konduktivnost slatke vode iznosi oko 200-800  $\mu$ S/cm.

#### 3.2.3 Priprema otopine za simulaciju

Slana voda je napravljena u dvije bačve volumena 50 l i 60 l. Korištena je komercijalna sol koja je postepeno miješana sa slatkom vodom dok nisu dobivene karakteristike slane vode što je prikazano na slici 10.

Brkić, M., Srzić, V.

### Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima



Slika 10. Miješanje soli sa slatkom vodom

Stavljano je postepeno oko 36 g morske soli na jednu litru slatke vode. Cilj je bio dobiti gustoću slane vode 1025 g/l, te salinitet oko 36 g/l. Da bi se razlikovala slatka voda od slane, korištena je crvena boja za hranu dr. Oetker. U svaku bačvu dodano je oko 76 ml boje, te se sastav obje bačve izmiješao da dobijemo homogenizirani sadržaj. Svojstva slane tekućine mjerena su cijelo vrijeme pomoću Seba hydrometra što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Provjeravanje parametara obojane slane vode



Brkić, M., Srzić, V.

## Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima

### 3.2.4 Praćenje eksperimenta

Dobivanjem zadovoljavajućih parametara slane vode, korištene su pumpe da pumpaju slanu vodu u spremnik sa slanom vodom. Stalni dotok slane vode u komoru osiguran je pumpom kapaciteta 25 l/min.

Korištene su dvije pumpe. Jedna pumpa je pumpala vodu iz bačve u komoru sa slanom vodom, a druga pumpa je vraćala vodu iz komore u bačvu. S ovim postupkom je osigurano kruženje iste slane vode, tako da je 110 litara slane vode unutar dvije bačve bilo dovoljno za provesti eksperiment što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Kruženje slane vode pomoću dvije pumpe

Stalne visine vodnog lica u objema komorama držale su se konstantnim sustavnom drenažnih cijevi koje su odnosile višak vode. Razlika u vodnim licima je 1,15 cm. Ovaj hidraulički gradijent prouzročio je stalni protok vode u smjeru komore sa slanom vodom. Nakon što se protok stabilizirao, ljepljivom trakom se prodor vode u komoru sa slanom vodom spriječio. Slana voda obojena crvenom bojom se sustavom pumpi upumpavala u komoru, dok se u isto vrijeme višak slatke vode pomoću drenažnih cijevi uklonio iz komore. Ovaj postupak je rađen dok u komori nisu dobiveni parametri koji odgovaraju slanoj vodi. Parametri su mjereni Seba hydrometrom što je prikazano na slikama 13. i 14. Nakon što su dobiveni zadovoljavajući parametri slane vode naglo je skinuta ljepljiva traka, tako da je komora sa slanom vodom opet bila povezana sa ostatkom sustava, te je slana voda mogla prodirati u srednju komoru s poroznim medijem. Intruzija slane vode (klina) automatski je snimana pomoću GoPro kamere svake minute. Praćenje i slikanje intruzije trajalo je 100 minuta.

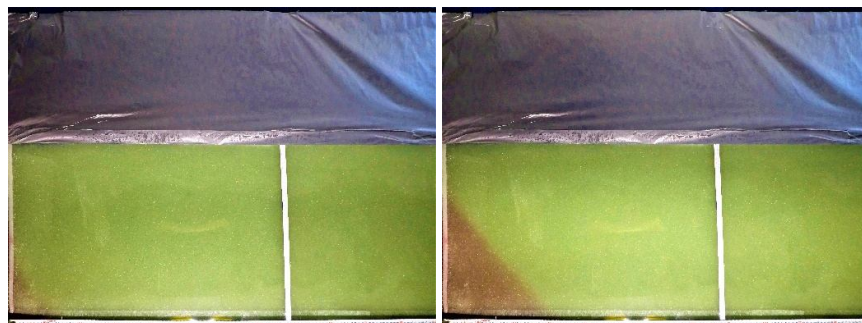
Brkić, M., Srzić, V.

**Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima**

Slike 13. i 14. Dodavanje obojane slane vode u spremnik i računanje njenih parametara

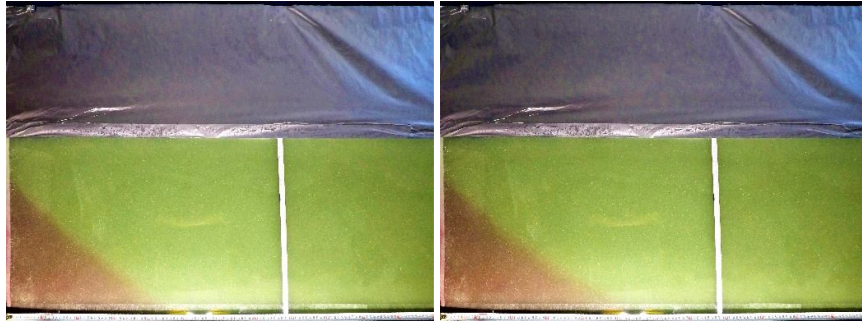
**3.2.5 Rezultati eksperimenta**

Nakon uklanjanja ljepljive trake, intruzija slane vode u porozni medij je zbog razlike u gustoći počela. Intruzija klina slane vode je napredovala s vremenom. Slike pokazuju oštru prijelaznu granicu između slanog klina i slatke vode. Oštra prijelazna granica vidljiva je kroz usko područje varijacije boje na prijelaznom području. Boja je u prijelaznom području svjetlija. Rezultati pokazuju da zona miješanja ne prelazi 1 cm. Slatka vode se kretala okomito uz klin slane vode i ulazila u komoru sa slanom vodom pri čemu je slatka voda zbog razlike u gustoći preko drenažnog sustava izlazila iz komore. Tijekom napredovanja klina opaža se prelazak iz linearnog oblika klina u parabolični oblik iz čega je vidljivo postepeno smanjivanje kuta između klina i dna vodonosnika. Klin se na početku kretao ubrzano, dok je nakon 90 minuta snimanja bitno usporio svoju kretanju približavajući se stanju ravnoteže što je prikazano na slikama 15.-22.

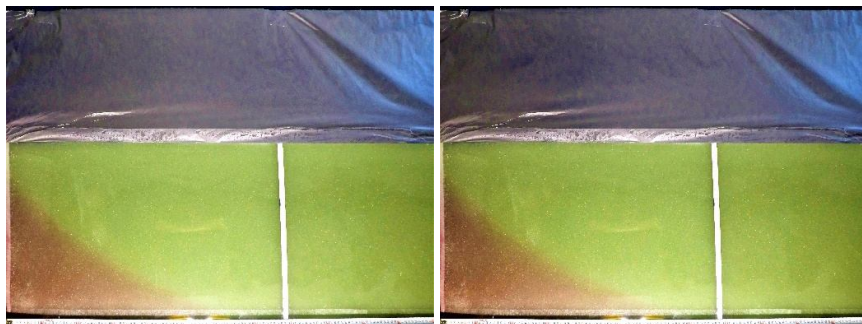


Slike 15. i 16. Prodor slanog klina u prvju minuti i nakon 15 minuta

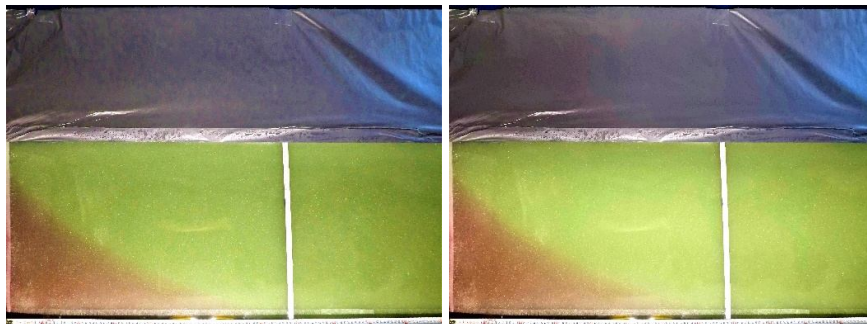
Brkić, M., Srzić, V.

**Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima**

Slike 17. i 18. Prodor slanog klina nakon 30 i 45 minuta



Slike 19. i 20. Prodor slanog klina nakon 60 i 75 minuta



Slike 21. i 22. Prodor slanog klina nakon 90 i 100 minuta

Na slikama 15. i 16. vidljivo je brzo kretanje slanog klina gdje je dužina klina 32 cm u horizontalnom smjeru, te 28 cm u vertikalnom smjeru kroz prvih 15 minuta mjerenja što je najbrži pomak kroz 15 minuta mjerenja. Ovdje je vidljiv linearni oblik klina. Tijekom trajanja eksperimenta intruzija klina sve je sporija. Na slici 17. nakon 30 minuta mjerenja vidljive su dimenzije klina od 46 cm u horizontalnom smjeru i 30 cm u vertikalnom smjeru, te je i dalje zadržan linearni oblik klina. Na slikama 19. i 20. vidljivo je smanjenje brzine intruzije klina, te je između 60. i 75. minute mjerenja vidljivo produljenje klina u horizontalnom smjeru s 64 cm na 71 cm, te u vertikalnom smjeru s 33 cm na 33,5 cm. Na slikama 19. i 20. vidljiv je jasan prijelaz oblika klina s linearnog na parabolični. Slike 21. i 22. prikazuju minimalno kretanje klina, te se u horizontalnom smjeru klin povećava za 2 cm u odnosu na prethodnu sliku, a u vertikalnom smjeru klin se povećava neznatno. Završna dužina klina u horizontalnom smjeru

Brkić, M., Srzić, V.

## Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima

je 80 cm, dok je završna vertikalna visina klina 33,5 cm. Kroz cijelo trajanje eksperimenta vidljiva je uska zona miješanja slatke i slane vode.

### 4. DISKUSIJA

Proveden je eksperiment simulacije intruzije morske vode u poroznom obalnom vodonosniku, pri čemu su dobivena saznanja o dinamici intruzije slanoga klina u poroznom mediju. Slani klin je dobiven za jednu vrstu poroznog medija i sa stalnim hidrauličkim gradijentom koji je održavan sustavom drenažnih cijevi. Koeficijent procjeđivanja za dano stanje u eksperimentu izračunato je prije pokusa pomoću Darcyjevog zakona.

Dimenzije i ponašanje samog klina ovise o mnogo čimbenika. U ovome eksperimentu korišten je jedan porozni medij određene poroznosti, te isti hidraulički gradijent (nisu mijenjane visine vodnih lica u komorama sa slatkom i slanom vodom). Preporučljivo je u daljnjem istraživanju koristiti porozne medije drugih promjera (druge poroznosti), te koristiti više slojeva različitih svojstava u jednome eksperimentu. Navedene promjene bi utjecale na koeficijent propusnosti, koji bi izravno utjecao na intruziju slanog klina. U daljnjem istraživanju preporučljivo je koristiti drugi hidraulički gradijent ili čak mijenjati gradijent tijekom samoga eksperimenta, te bi se time prikazalo reagiranje slanog klina prilikom promjena vodnog lica. U ovome eksperimentu korištena je slana voda u idealnim uvjetima prosječne gustoće od 1025 g/l, te se preporučuje u budućim eksperimentima ispitati ponašanje slanog klina u rjeđoj ili gušćoj otopini slane vode od standardne vrijednosti.

### 5. ZAKLJUČAK

Proveden je eksperiment simulacije intruzije morske vode u poroznom obalnom vodonosniku. Kao što je vidljivo na slikama 15.-22., zbog razlike u gustoći slane vode u odnosu na slatku vodu vidljiva je intruzija slane vode u poroznom mediju. Slani klin na samome početku ima najveću silu probijanja u porozni medij. Što se klin približava stanju ravnoteže sve su neznatnije promjene u obliku samoga klina. Uvjeti u laboratoriju nisu omogućili praćenje stanja klina do stvarnoga stanja ravnoteže koje bi se postiglo za više od 100 minuta mjerenja. Završna dužina klina u horizontalnom smjeru iznosila je 80 cm, dok je visina klina iznosila 33,5 cm nakon 100 minuta mjerenja. Eksperiment je pokazao da je uska zona miješanja slane i slatke vode, te da se slatka voda kreće uz rub klina i izlazi iz srednje komore. Slatka voda iz srednje komore ulazi u komoru sa slanom vodom gdje se zbog razlike u gustoći odvaja na vrh komore, te se sustavnom drenažnih cijevi odvaja iz komore. Tijekom trajanja eksperimenta opaža se prijelaz iz linearnog oblika klina u parabolni oblik. Nakon četiri uzastopna mjerenja izračunat je prosječni koeficijent procjeđivanja, te je koeficijent procjeđivanja iznosio  $1,67 \cdot 10^{-2}$  m/s.

Rezultati ovoga eksperimenta će pomoći u budućem planiranju rješavanja problema intruzije slane vode u obalne vodonosnike.

### LITERATURA

1. Bear, J., Cheng, A.H.-D., Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts, methods and practices. In: Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera: I. (Eds.), Theory and Applications of Transport in Porous Media, vol. 14, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.

Brkić, M., Srzić, V.

**Modeliranje intruzije morske vode u obalni vodonosnik u laboratorijskim uvjetima**

2. Xue, Y.Q., Wu, J.C., Xie, C.H., Zhang, Y.X., Research of seawater and salt water intrusion of Laizhou Bay, Chinese Science Bulletin, str. 2360-2368, Nanjing University, Nanjing, 1997.
3. Han, D., Kohfahl, C., Song, X., Xiao, G., Yang, J., Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, Applied Geochemistry, Beijing, 2011.
4. U.S. Geological Survey (USGS), Groundwater resources for the future-Atlantic Coastal Zone, Fact Sheet 085-00, Reston, VA, 2000.
5. Moreno-Gonzales, R., Rodriguez-Mozaz, S., Gros, M., Barcelo, D., Leon, V.M., Seasonal distribution of pharmaceuticals in marine water and sediment from a Mediterranean coastal lagoon (SE Spain), str. 326-344, Murcia, 2015.
6. Guo, Q.N., Huang, J.W., Zhou, Z.F., Wang, J.G., Experiment and numerical simulation of seawater intrusion under the influences of tidal fluctuation and groundwater exploitation in coastal multilayered aquifers, Geofluids, Nanjing, 2019.
7. Henry, H.R., Salt intrusion into coastal aquifers, Ph.D. thesis, Columbia University, New York, 1960.
8. Croucher, A.E., O'Sullivan, The Henry problem for saltwater intrusion, Water Resour. Res. 31, Auckland, 1995.
9. Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B., Werner, A.D., Simmons, C.T., Sea-level rise impact on fresh groundwater lenses in two-layer small islands, Hydrological Processes, str. 5938-5953, Tehran, 2014.
10. Shi, W.L., Lu, C.H., Ye, Y., Wu, J.C., Li, L., Luo, J., Assessment of the impact of sea-level rise on steady-state seawater intrusion in a layered coastal aquifer, Journal of Hydrology, 563, str. 851-862, Nanjing, 2018.
11. Guo, Q., Zhang, Y., Zhou, Z., Zhao, Y., Saltwater transport under the influence of sea-level rise in coastal multilayered aquifers, Journal of Coastal Research, Coconut Creek, Florida, 2020.
12. Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A., A density-dependant finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers, Journal of Hydrology, str. 259-271, Exeter, 2011.
13. Mehdizahed, S.S., Karamalipour, S.E., Asoodeh, R., Sea level rise effect on seawater intrusion into layered coastal aquifers (simulation using dispersive and sharp-interface approaches), Ocean Coastal Manag, str. 11-18, 2017.
14. Sun, D.M., Niu, S.X., Zang, Y.G., Impacts of inland boundary conditions on modeling seawater intrusion in coastal aquifers due to sea-level rise, Natural Hazards, str. 1-19, 2017.
15. Sefelnasr, A., Sherif, M., Impacts of seawater rise on seawater intrusion in the Nile Delta aquifer, Ground Water, 52(2), str. 264-276, Assuit, 2014.
16. Goswami, R.R., Clement, T.P., Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, Water Resour. Res. 43, Auburn, 2007.
17. Kuan, W.K., Jin, G., Xin, P. i suradnici, Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers, Water Resour. Res. 48, str. 136-149., Queensland, 2012.
18. Na, J., Chi, B., Zhang, Y., Li, J., Jiang, X, Study on the influence of seawater density variation on sea water intrusion in confined coastal aquifers, Springer-Verlag GmbH, 2019.
19. Urumović, K., Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda, Rudarsko-geološki-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003.